ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №3. С. 91–105

ПАРОУГЛЕКИСЛОТНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ БИОМАССЫ КЛЕТОК МИКРООРГАНИЗМОВ ПРОДУКТАМИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

С. М. Фролов[1], В. А. Сметанюк[2], И. А. Садыков[3], А. С. Силантьев[4], К. А. Авдеев[5], П. О. Виноградов[6], Я. С. Дудко[7], А. Б. Воробьёв[8], А. В. Иноземцев[9], Я. О. Иноземцев[10], Я. К. Хасяк[11], Ф. С. Фролов[12], А. В. Евланов[13], М. И. Молодид[14]

Аннотация: Биомасса клеток микроорганизмов (БКМ) — отход пищевой промышленности с характерным дрожжевым запахом и влажностью около 70 %(масс.). Содержание C, O, H и N в сухой БКМ: 43,0, 34,4, 6,7 и 7,7 %(масс.) соответственно; минеральные компоненты в БКМ (зольность 8,2 %(масс.)) представлены в основном соединениями P, K и S, а также Fe, Zn, Cl, Ca и Cu; высшая теплота сгорания БКМ 18,2 МДж/кг. Цель работы — на основе термодинамических расчетов и лабораторного эксперимента определить наилучшие условия аллотермической газификации БКМ разной влажности (α = 70, 30 и 5 %(масс.)) продуктами газовой детонации, играющими роль высокотемпературного пароуглекислотного газифицирующего агента (ГА), и доказать возможность «самозапитки» процесса газификации, т. е. использования получаемого генераторного газа для генерации ГА. Под наилучшими условиями газификации БКМ понималось отношение массовых расходов БКМ/ГА, при котором достигался наибольший выход газа с наименьшим содержанием CO_2. Термодинамический расчет показал, что процесс газификации БКМ продуктами детонации стехиометрической кислородной смеси стартового горючего (природного газа) и стехиометрической кислородной смеси генераторного газа следует проводить при давлении 0,1 МПа, температуре не менее 1500 K и массовом отношении $m = \text{БКМ/ГА} = 0{,}8–2{,}5$ в зависимости от влажности сырья (чем меньше влажность, тем больше m), причем получаемый сухой газ будет содержать до 49,8 %(об.) CO, 46,4 %(об.) H_2 и 3,8 %(об.) N_2, обладать низшей теплотворной способностью не менее 15,8 МДж/кг и допускать самозапитку процесса газификации с коэффициентом самозапитки — отношением расхода газа на самозапитку к полному выходу газа — менее 17%. На лабораторной проточной установке проведены эксперименты по газификации БКМ разной влажности. Для генерации ГА, в основном состоящего из H_2O и CO_2, в экспериментах использовалась импульсно-детонационная пушка (ИДП), работающая с частотой 1 Гц. В экспериментах получен генераторный газ, содержащий от 73 до 82 %(об.) горючих газов (CO, H_2, CH_4 и C_xH_y), причем основным негорючим компонентом был CO_2 (содержание от 18 до 27 %(об.)), а самым тяжелым зарегистрированным углеводородом C_xH_y был пропан (менее 0,1 %(об.)), т. е. конденсируемые углеводороды (смолы) в газе отсутствовали. В экспериментах по газификации БКМ с α = 5 %(масс.) доказана возможность самозапитки ИДП получаемым газом: экспериментальное значение коэффициента самозапитки оказалось приблизительно равным 63%. Различие в измеренных и расчетных составах газа и в значениях коэффициента самозапитки, по-видимому, связано с тепловыми потерями и нерасчетными условиями смешения реагентов в эксперименте.

Ключевые слова: биомасса клеток микроорганизмов; аллотермическая газификация; водяной пар; диоксид углерода; генераторный газ; импульсно-детонационная пушка; самозапитка

DOI: 10.30826/CE26190309 **EDN:** EYQZYP

[1]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru
[2]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smetanuk@mail.ru
[3]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ilsadykov@mail.ru
[4]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, silantevu@mail.ru
[5]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru
[6]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vinarbeit@yandex.ru
[7]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, YaSDudko@yandex.ru
[8]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, alexey.vorobyov@chph.ras.ru
[9]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, alexey.inozemtzev@chph.ras.ru
[10]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, yaroslav.inozemtsev@chph.ras.ru
[11]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, hasiak1996@gmail.com
[12]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru
[13]ООО «Бирюч», a.evlanov@efko.ru
[14]ООО «Бирюч», m.molodid@efko.ru

Литература

1. *Chew K. R., H. Y. Leong, K. S. Khoo, D.-V.-N. Vo, H. Anjum, C.-K. Chang, P. L. Show*. Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: A review // Environ. Chem. Lett., 2021. Vol. 19. P. 2921–2939. doi: 10.1007/s10311-021-01220-z.
2. *Wang H., Xu J., Sheng L.*. Study on the comprehensive utilization of city kitchen waste as a resource in China // Energy, 2019. Vol. 173. P. 263–277. doi: 10.1016/j.energy.2019.02.081.
3. *Dongyang L., Mengyang S., Jianfeng X., Tiancheng G., Meiying Y., Yi X., Tianxue Y.* 2022.Effect of biochar derived from biogas residue on methane production during dry anaerobic fermentation of kitchen waste // Waste Manage., 2022. Vol. 149. P. 111–121. doi: 10.1016/j.wasman.2022.06.006.
4. *Shen Y.* A review on hydrothermal carbonization of biomass and plastic wastes to energy products // Biomass Bioenerg., 2020. Vol. 134. P. 105479. doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105479.
5. *Van Caneghem J., Brems A., Lievens P., Block C., Billen P., Vermeulen I., Dewil R., Baeyens J., Vandecasteele C.* Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues // Prog. Energ. Combust., 2012. Vol. 38. P. 551–582. doi: 10.1016/j.pecs.2012.03.001.
6. *Li H., Xu J., Mbugua Nyambura S., Wang J., Li C., Zhu X., Feng X., Wang Y.* Food waste pyrolysis by traditional heating and microwave heating: A review // Fuel, 2022. Vol. 324. P. 124574. doi: 10.1016/j.fuel.2022.124574.
7. *Hamad M. A., Radwan A. M., Heggo D. A., Moustafa T.* Hydrogen rich gas production from catalytic gasification of biomass // Renew. Energ., 2016. Vol. 85. P. 1290–1300. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.082.
8. *Фролов С. М.* Газификация органических отходов ультраперегретым водяным паром и диоксидом углерода // Горение и взрыв, 2021. Т. 14. № 3. С. 74–97. doi: 10.30826/CE21140308.
9. *Burra K. G., Hussein M. S., Amano R. S., Gupta A. K.* Syngas evolutionary behavior during chicken manure pyrolysis and air gasification // Appl. Energ., 2016. Vol. 181. No. 1. P. 408–415.
10. *Lombardi L., Carnevale E., Corti A.* A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste // Waste Manage., 2015. Vol. 37. P. 26–44.
11. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Набатников С. А.* Способ получения сильно перегретого пара и устройство детонационного парогенератора (варианты). Патент РФ № 2686138 от 24.04.2019. Приоритет от 26.02.2018.
12. *Frolov S. M., Silantiev A. S., Sadykov I. A., et al.* Composition and textural characteristics of char powders produced by thermomechanical processing of sunflower seed husks // Powders, 2023. Vol. 2. P. 624–638. doi: 10.3390/powders2030039.
13. *Frolov S. M., Silantiev A. S., Sadykov I. A., Smetanyuk V.A., Frolov F. S., Hasiak J. K., Vorob'ev A. B., Inozemtsev A. V., Inozemtsev J. O.* Gasification of waste machine oil by the ultra-superheated mixture of steam and carbon dioxide // Waste, 2023. Vol. 1. P. 515–531. doi: 10.3390/waste1020031.
14. *Frolov S. M.* Organic waste gasification by ultra-superheated steam // Energies, 2023. Vol. 16. P. 219. doi: 10.3390/en16010219.
15. *Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Sadykov I. A., Silantiev A. S., Frolov F. S., Popkova V. Y., Hasiak J. K., Buyanovskaya A. G., Takazova R. U., Dudareva T. V., Bekeshev V. G., Vorobyov A. B., Inozemtsev A. V., Inozemtsev J. O.* High-temperature steam- and CO_2-assisted gasification of oil sludge and petcoke // Clean Technologies, 2025. Vol. 7. P. 17. doi: 10.3390/cleantechnol7010017.
16. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А. С., Авдеев К. А., Фролов Ф. С., Воробьев А. Б., Иноземцев А. В., Иноземцев Я. О., Коверзанова Е. В., Гордиенко Ю. А., Блинов Н. Д., Дударева Т. В., Попкова В. Я.* Газификация отходов животноводства ультраперегретой смесью водяного пара и диоксида углерода // Горение и взрыв, 2025. Т. 18. № 2. С. 63–91. doi: 10.30826/CE25180207.
17. *Frolov S. M., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Vlasov P. A.* Ion sensors for pulsed and continuous detonation combustors // Chemosensors, 2023. Vol. 11. No. 33. doi: 10.3390/chemosensors11010033.
18. *Goodwin D. G., Moffat H. K., Schoegl I., Speth R. L., Weber B. W.* Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Version 3.0.0, 2023. doi: 10.5281/zenodo.8137090.
19. SDToolBox — numerical tools for shock and detonation wave modeling. https://shepherd.caltech.edu/SDT.

Поступила в редакцию 28.01.2026
После доработки 10.04.2026
Принята к публикации 14.04.2026